

利用RothC模式進行土壤有機碳固存潛力 時空變化分析-以濁水溪流流域為例

農試所農化組 許健輝 顏淳阡 劉滄琴

一、前言

土壤為陸地上最大碳庫，2公尺深度的土壤有機碳(soil organic carbon, SOC)儲量約為2,400 Gt C (2.4兆噸)，約為大氣中碳量的3倍，生物碳量的4倍(Zamanian et al., 2021)。千分之四倡議提出每年增加土壤有機碳儲量0.4%，則能抵銷人為排放之二氧化碳，表示土壤有機碳儲量的微小變化足以對大氣中溫室氣體濃度產生巨大影響(Minasny et al., 2017)。土壤中碳儲量與碳損失之間的平衡影響土壤有機碳固存潛力(SOC sequestration potential)，氣溫、雨量、土壤排水能力及pH等皆會影響有機質分解速率，土壤中的團粒構造、細顆粒含量(如粉粒和黏粒)也會影響礦物與有機質之結合穩定性(Paustian et al., 2019)。

農地在土壤有機碳固存中扮演重要角色，農地土壤有機碳儲量可透過農業管理增加，但受到多種因素影響。瞭解

不同氣候和管理方法下土壤有機碳固存潛力的程度、速率及控制因子，搭配時間與空間分析技術，有助於決策者和土地管理者進行農業規劃和評估，進而實現淨零與負碳排放目標(Tao et al., 2023)。雖然過去已對土壤有機碳儲量進行廣泛的調查和長期試驗研究，但對於土壤有機碳在時間-空間變化的探討有限，因此，本文將介紹如何利用RothC模式(土壤有機碳動態模式)搭配農業空間資料(氣候、植生指數、土壤性質等)，模擬不同土壤管理(以碳輸入之差異表示)情境下土壤有機碳時空變化之案例分析。

二、RothC(土壤有機碳動態)模式簡介

RothC模式最初是根據英國洛桑(Rothamsted)長期田間試驗開發，以模擬非浸水(non-waterlogged)情境下耕地表土中有機碳的轉化(turnover)，後來也延伸用於不同土壤類型、土地利用及氣候條件，現今更擴展至田間、區域及全球尺度(Francaviglia et al., 2012)。RothC模式以月份為時間單位，參考土壤類型、溫度、水分含量及植被覆蓋對土壤有機碳轉化的影響，著重於土壤的碳輸入(carbon inputs)，並將其分為4個活性部分

作者：許健輝副研究員
連絡電話：04-23317435

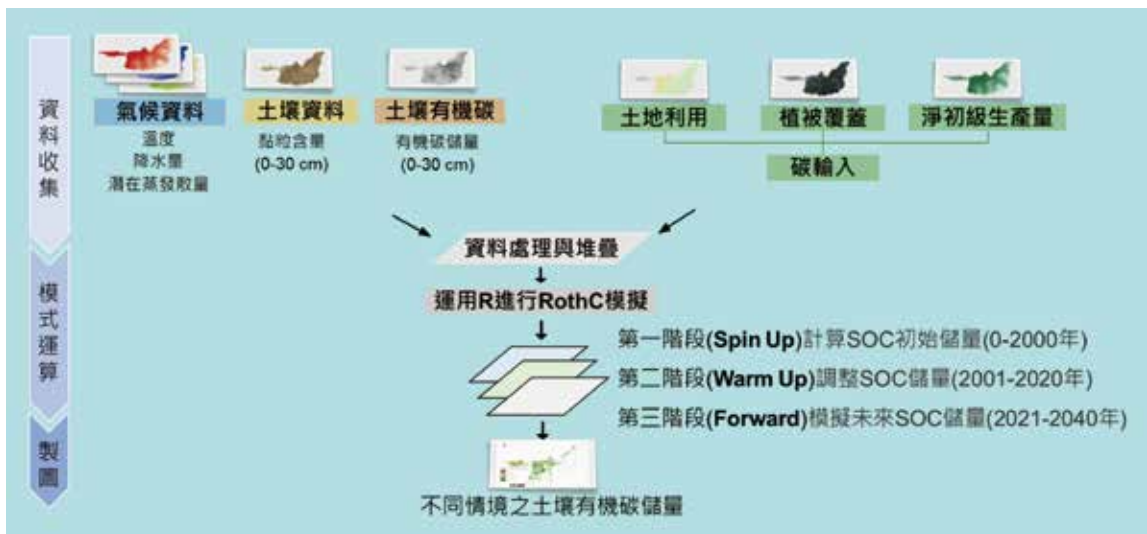
(active compartments)，包含可分解植物體(decomposable plant material, DPM)、抗性植物體(resistant plant material, RPM)、微生物體(microbial biomass, BIO)及腐植化有機物(humified organic matter, HUM)和非活性部分(inactive compartment)的惰性有機物(inert organic matter, IOM)。

土壤固碳必須增加以有機質型式儲存的碳，農業利用下，碳儲量消耗最為快速，以不改變土地利用(例如農地轉森林)，而是改變土壤管理措施，不僅可提升土壤健康與土壤品質，也不會產生對土地資源的競爭。因此，本文針對可進行土壤管理之土地利用進行探討，舊有之土壤管理情境(business as usual scenario, BAU)指目前在農地實施之土壤管理方法，代表特定生產系統中典型及普遍的方法；永續土壤管理情境(sustainable soil management scenario, SSM)指與BAU相比，能減少土壤有機碳損失並增加其累積之土壤管理方法，例如增加土壤碳輸

入及提高土壤有機質含量之方式(殘留物返回土壤、使用覆蓋作物或輪作等方法)(Peralta et al., 2022)。

三、濁水河流域案例分析

利用R運行空間化RothC模式計算土壤有機碳儲量及每年有機碳輸入，接著將其應用於計算2021-2040年不同碳輸入下的土壤有機碳固存潛力。分析範圍為臺灣中部的濁水河流域，根據全球土壤有機碳固存潛力圖(GSOCseq)技術手冊(Peralta et al., 2022)，其估算土壤有機碳固存之重點放在農地(不包含森林地)，使用RothC模式概念進行三階段之運行，包含Spin up、Warm up及Forward，輸入資料包含氣候、土壤、土地利用、植被覆蓋及碳輸入，解析度設定為100公尺。相對於BAU，3種SSM土壤管理情境為碳輸入分別增加5% (SSM1)、10% (SSM2)及20% (SSM3)，整體模擬流程如圖一。



圖一、利用R運行空間化RothC模式模擬SOC儲量之流程。

A. 圖資收集

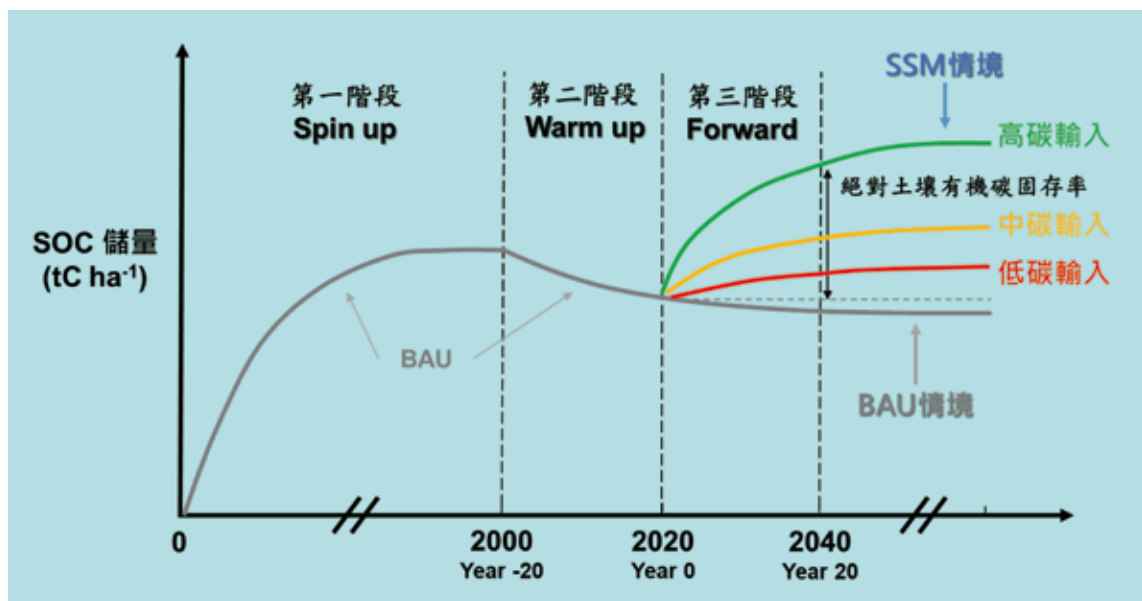
1. 氣候(月平均溫度、降水量及潛在蒸發散量)：從Google Earth Engine下載TerraClimate資料集之1981-2020年解析度1000公尺之衛星資料。
2. 土壤：農業試驗所土壤調查分析資料並面化而成解析度100公尺之0-30公分表土總土壤有機碳儲量($t\ C\ ha^{-1}$)及黏粒含量(%)圖資。
3. 土地利用：2015年解析度100公尺之土壤覆蓋調查資料，將土地利用分為旱作、水田、果樹、森林及其他。
4. 植被覆蓋：從Google Earth Engine下載Sentinel 2資料集之2018-2023年解析度100公尺之衛星資料，以計算常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)。
5. 碳輸入：氣候資料中1981-2020年溫度及降雨資料，運用MIAMI模型計算

淨初級生產量(Net Primary Production, NPP)，以根據NPP進行碳輸入之調整。MIAMI模型為將全球NPP資料與長期溫度及降雨資料進行迴歸得出之函數，其需要之輸入資料簡單，且已應用於大範圍區域(Gottschalk et al., 2012)。

B. 模式運算

所有輸入圖層皆準備好、處理並堆疊後，即可運行以下3個建模階段，每個階段輸出之向量點資料將用作下個階段的輸入資料，最後將輸出之向量點資料轉換成柵格檔案以建立碳固存圖。

1. Spin up (0-2000年)：模擬時長為2000年，輸入資料包含濁水河流域範圍之shapefile、SOC儲量、黏粒含量、1981-2000年氣候資料、土地利用、植被覆蓋，最後產出2000年之SOC儲量、碳輸入及各碳庫(DPM、RPM、



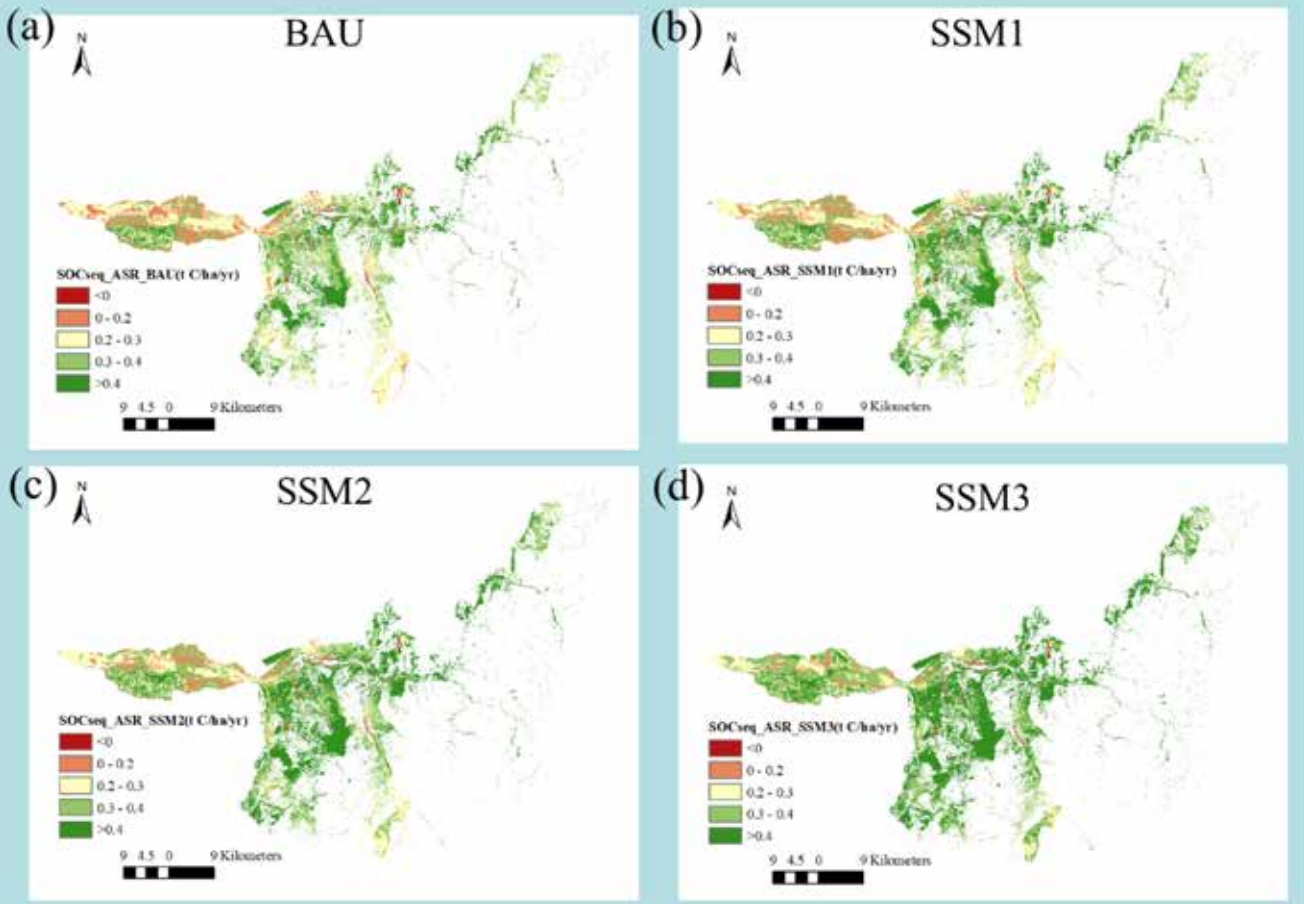
圖二、利用R運行空間化RothC模式模擬三階段過程SOC儲量示意圖。

BIO、HUM及IOM)碳儲量，此階段目的為藉由運行至平衡確定初始值以利後續運算。

2. Warm up (2001-2020年)：模擬時長為20年，輸入資料除了包含Spin up之輸出資料，其他皆與Spin up階段大致相同，不同之處為氣候資料年度自2001-2020年，及增加輸入NPP資料，最後產出2020年之SOC儲量、碳輸入及各碳庫碳儲量，此階段為利用Spin

up階段得出之2000年SOC儲量及初始碳輸入，並利用NPP之變化以進行SOC儲量之調整。

3. Forward (2021-2040年)：模擬時長為20年，輸入資料除了包含Warm up之輸出資料，其他皆與Warm up階段大致相同，不同之處為運算時增加3種SSM情境碳輸入，最後產出2040年之BAU及三種SSM情境之SOC儲量、碳輸入及各碳庫碳儲量(圖二)。



圖三、絕對土壤有機碳固存率(absolute SOC sequestration rates, SOCseq_ASR) ($\text{t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)，相對於2020年，2021年至2040年BAU和SSM下絕對SOC固存潛力的空間分布，(a)舊有之土壤管理 (business as usual scenario, BAU)；(b)永續土壤管理(sustainable soil management scenario, SSM)，SSM1：碳輸入增加5%；(c) SSM2：碳輸入增加10%；(d) SSM3：碳輸入增加20%。

模擬結果顯示，不同碳輸入情境下，在模型Spin up階段模擬2000年平衡時之年碳輸入為1.77-2.66 t C ha⁻¹ yr⁻¹，平均為2.23 t C ha⁻¹ yr⁻¹，2021-2040年相對於2020年之土壤有機碳固存潛力BAU、SSM1、SSM2及SSM3分別平均為0.30、0.33、0.36及0.41 t C ha⁻¹ yr⁻¹，隨著模擬之碳輸入越高，碳固存潛力越大（圖三）。由試驗區結果顯示，濁水河流域上游相較於下游有更大之碳固存潛力，在BAU情境下濁水河流域農牧用地中彰化二水鄉、大城鄉、雲林麥寮鄉、荊桐鄉及南投集集鎮之碳固存潛力較低（0.22-0.23 t C ha⁻¹ yr⁻¹），而南投竹山鎮、名間鄉、仁愛鄉、鹿谷鄉、魚池鄉及嘉義竹崎鄉之碳固存潛力較高（0.23-0.35 t C ha⁻¹ yr⁻¹）。此外，模擬結果也顯示，不同土地利用下有相異之土壤有機碳固存潛力，並且在相同土地利用下之土壤有機碳固存潛力隨土壤黏粒含量增加而提升。本研究結果提供土壤有機碳固存潛力空間分布資訊，可作為負碳農耕執行區位規劃之參考。

四、方法限制

以下為本文使用的方法限制與未來可改善之處(Stockmann et al., 2013; Peralta et al., 2022)。

- 1.其他模型：可嘗試比較不同土壤有機碳動態模型(CENTURY或CANDY等)之估計結果，或使用多模型整合方法，使模擬更符合實際情況。

- 2.經驗參數：參數大多來自溫帶地區實驗結果，熱帶地區與溫帶地區之差異性可能導致參數的不同，並影響估計結果之準確性及模型在不同地區之適用性。
- 3.土壤性質：本研究方法只利用黏粒含量作為土壤性質參數，但多種土壤性質(土壤陽離子含量或土壤pH等)可能也是影響土壤有機碳轉化之關鍵因子。
- 4.水田預測：最初RothC模式之開發為用於非浸水土壤之有機碳轉化，因此可嘗試進一步優化水稻等特定作物情況下之參數設定，使估計結果更準確。
- 5.深層土壤：雖然本研究著重於對土地利用變化較敏感之表層土壤SOC，但也不可忽視深層土壤有機碳固存潛力。
- 6.氣候變化：未來之氣候變遷與全球暖化可能影響土壤有機碳動態，因此除了本研究運用過去監測之氣候資料，也可思考其他氣候資料之可能性。

五、結論與展望

瞭解土壤功能有助於維持和提高農業生產力以滿足未來之糧食需求，而全球農業土壤退化的情況必須有所改善，因此，了解土壤有機碳穩定過程、土壤生物及非生物對其之影響將有助於發展土壤有機碳時間-空間動態預測模型，本文案例分析嘗試結合氣候與土壤等農業空間資料，運用空間化RothC土壤有機碳

動態模式模擬區域尺度下，不同土地利用類型在不同碳輸入下之有機碳時空變化，進而估算該區域土壤有機碳固存潛力。未來可進一步將模擬區域擴大至全臺，納入國內不同土壤管理之碳輸入係數，並將模擬時間延長至2050年或2100年，比較不同氣候變遷情境之土壤有機碳固存潛力，作為農業部門評估2050年是否能夠達到淨零排放之重要參考依據。

六、參考文獻

- Francaviglia, R., Coleman, K., Whitmore, A. P., Doro, L., Urracci, G., Rubino, M., & Ledda, L. (2012). Changes in soil organic carbon and climate change—Application of the RothC model in agro-silvo-pastoral Mediterranean systems. *Agricultural Systems*, 112, 48-54.
- Gottschalk, P., Smith, J. U., Wattenbach, M., Bellarby, J., Stehfest, E., Arnell, N., ... & Smith, P. (2012). How will organic carbon stocks in mineral soils evolve under future climate? Global projections using RothC for a range of climate change scenarios. *Biogeosciences*, 9(8), 3151-3171.
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., ... & Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59-86.
- Paustian, K., Collier, S., Baldock, J., Burgess, R., Creque, J., DeLonge, M., ... & Jahn, M. (2019). Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system. *Carbon Management*, 10(6), 567-587.
- Peralta, G., Di Paolo, L., Luotto, I., Omuto, C., Mainka, M., Viatkin, K., & Yigini, Y. (2022). Global soil organic carbon sequestration potential map (GSOCseq v1. 1)—Technical manual. Food & Agriculture Org.
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., ... & Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80-99.
- Tao, F., Palosuo, T., Lehtonen, A., Heikkinen, J., & Mäkipää, R. (2023). Soil organic carbon sequestration potential for croplands in Finland over 2021–2040 under the interactive impacts of climate change and agricultural management. *Agricultural Systems*, 209, 103671.
- Zamanian, K., Zhou, J., & Kuzyakov, Y. (2021). Soil carbonates: The unaccounted, irrecoverable carbon source. *Geoderma*, 384, 114817.